



TITLE:

# 揺動力による恒星系の進化 (輻射流体力学の運動方程式研究会報告集)

AUTHOR(S):

清水, 彊

---

CITATION:

清水, 彊. 揺動力による恒星系の進化 (輻射流体力学の運動方程式研究会報告集). 数理解析研究所講究録 1968, 43: 49-64

ISSUE DATE:

1968-05

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/107666>

RIGHT:

## 揺動力による恒星系の進化

京大 理 清水 彊

## § 1 序

恒星の力学的な1集団をまわす恒星系は、いわば恒星という粒子からなるガス塊とみなさるので、気体運動論的な取扱いが可能である。ただし、恒星ガスがふつうのガスと趣を異にするのは、(i)一般に極めて希薄で、mean free path が系の大きさのオーダーよりも大きいこと、(ii)気体の状態方程式のような関係が速度分散と分布密度の間に成立たぬことである。観測されている大部分の恒星系は対称形状をもち、流体力学的にほぼ安定と思われその内部構造を示しているが、上記(i)を考えあわせて、大部分の対称型恒星系は準定常状態にあるとの見解が広く受けいれられている。<sup>1)</sup>

恒星ガスが希薄であることは観測事実であるが、恒星ガス内における各粒子の相互作用あるいは遠隔作用の評価については、しきれない問題があるように思われる。恒星ガス中の

遭遇作用については, Jeans<sup>2)</sup>以来 Chandrasekhar<sup>3)</sup>, Spitzer<sup>4)</sup>, von Hörner<sup>5)</sup>, Kitamura<sup>6)</sup> のほか多くの研究があるが, 原理的にはいかなるも2体遭遇(binary encounter)論に基づくものであつて, (i) テスト粒子からある制限距離(cut-off distance)内に起るフィールド粒子との2体遭遇の効果を考えるか, あるいは(ii)遠距離遭遇の累積効果の方を重視し, それを Fokker-Planck 方程式によつて評価するかの2つの立場に大別できよう。

他方これとは独立な確率論的立場から, Holtsmark<sup>7)</sup> がスペクトルの理論付けのために展開した揺動力理論は, Chandrasekhar, von Neumann<sup>8)</sup>によつて, 恒星ガスの場合に言及されるが, 揺動力の時間的および空間的变化に関する確率論的考察への拡張がなされた。しかし, 彼等の結果は揺動力の r.m.s. (自乗平均の平方根)を無限大とするので不合理といわねばならない。たゞし, これらの理論ではガスの構成粒子は点であつて, その空間分布は全く at random ではあるが平均的には一定で無限に広がつてゐるとのモデルが採用されている。それ故 Camm<sup>9)</sup> は, 粒子が有限の半径をもちまたガス系も有限な半径をもつ球であるようなモデルに変えて, その中心における揺動力の頻度分布を求めた。しかし, 彼の表式を用いても, 銀河系内における太陽近傍の揺動力の r.m.s. は, 太陽近傍における銀河回転のオーガーよりも小さくはならず, 従来の2体遭遇

論に基づく常識からは受入れ難い。このためか、確率論的な場からは Camm 以後の発展はみられない。

ここでは、後者の確率論的な場に基づき、恒星ガスの揺動力を吟味し、さら恒星ガスの進化過程を考察しようとする試みについての大筋の考え方を述べる。

- |   |   |
|---|---|
| 1) K.F. Ogorodnikov, Dynamics of Stellar Systems (1965), Oxford.<br>2) J.H. Jeans, Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics (1919), Cambridge.<br>3) S. Chandrasekhar, Principles of Stellar Dynamics (1942), New York.<br>4) L. Spitzer and M. Schwarzschild, Ap. J., <u>114</u> , 385, (1957) | 5) S. von Hoerner, Die Entstehung der Sterne, R 251 (1959), Berlin.<br>6) S. Kitamura, J.A.S.P., <u>18</u> , 317, (1966)<br>7) J. Holtsmark, Ann. d. Physik, <u>58</u> , 577 (1919); Phys. Zeits., <u>20</u> , 162, (1919); <u>25</u> , 73 (1924)<br>8) S. Chandrasekhar-J. von Neumann, Ap. J., <u>95</u> , 469, (1942); <u>97</u> , 1 (1943)<br>9) G.L. Camm, M. N., <u>126</u> , 283, (1963) |
|---|---|

## § 2. 揺動力およびその時間微係数の頻度分布

### a) モデルについての仮定:

- (i) 各恒星の質量  $m$  および半径は一定である。
  - (ii) 恒星ガスは無限に広がっており、その空間分布は全く at random ではあるが、空間的な平均密度は一定で  $m_0$  とする。
  - (iii) 恒星の速度分布は、どこでも同一で Maxwellian law
- (1) 
$$f(u, v, w) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(u^2+v^2+w^2)}$$
 に従う。 ( $\sigma$ : 一方向の速度分散)
- (iv) フィールド星相互間の引力による影響は無視する。
- 従って、各フィールド星はテスト星に対しそれぞれケプラー運動を行なう。(恒星ガスが希薄であること

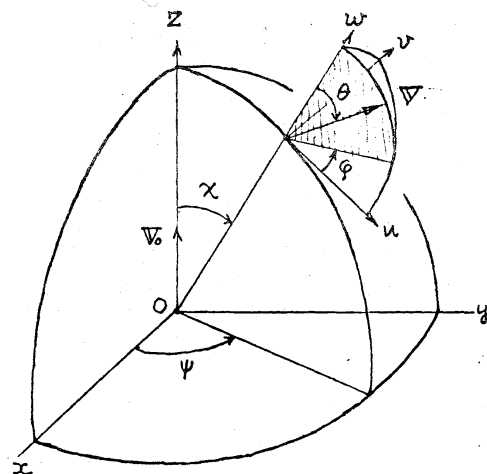
から許容できる近似)

- (v) テスト星に対し逃脫速度をもつフィールド星のみが  
テスト星への揺動力に寄与する。

以上のうち (v) の仮定を加へたことがこのモデルの特徴であ  
つて、逃脫速度以下の相対速度をもつフィールド星は捕獲さ  
れて連星系を形成すると考えらるため、その影響を除いた。  
これは2体遭遇論では、逃脫星のみがテスト星に遭遇するの  
に対応している。太陽近傍では、恒星間の平均距離が約2.2  
pc, 恒星の速度分散 $\sigma$ は約12 km/s (空間速度の分散はこの $\sqrt{3}$ 倍)  
であるが、この平均距離だけ離れた2星に0.09 km/s 以上の速  
さの違いがあれば互に逃脫するので、(v) の仮定は過大の制限  
を課したことはないであろう。

- b) 揺動力Fおよびその時間変化Fの頻度分布函数:

右図のような座標系の原点O  
にあるテスト星が速度 $V_0$ をもつ  
てx-軸方向に進んでいくとす  
れば、位置 $(r, \chi, \psi)$ において相  
対速度 $\nabla(V, \theta, \phi)$ で動く1つの  
フィールド星がテスト星の単位  
質量に働く引力 $F$ およびその時  
間変化 $\dot{F}$ は次式で与えられる。



$$(2) \quad \vec{f} = \frac{Gm}{r^3} \vec{r}, \quad \ddot{\vec{r}} = \frac{Gm}{r^3} \vec{r} - 3 \frac{Gm}{r^5} \vec{r} (\nabla \cdot \vec{r}).$$

また、フィールド星がテスト星に対し逃脱星であるための条件は、

$$(3) \quad v^2 \geq \frac{\mu}{r}, \quad \mu \equiv 4Gm.$$

従って、 $N$ 個のフィールド星によるテスト星への揺動力  $\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{f}_i$  およびその時間微分  $\dot{\vec{F}} = \sum_{i=1}^N \dot{\vec{f}}_i$  の頻度分布関数  $W(\vec{F}, \dot{\vec{F}})$  は<sup>8)</sup>

$$(4) \quad W(\vec{F}, \dot{\vec{F}}) = \frac{1}{64\pi^6} \int_{|\vec{q}|=0}^{\infty} \int_{|\vec{\sigma}|=0}^{\infty} e^{i(\vec{q}\vec{F} + \vec{\sigma}\dot{\vec{F}})} A(\vec{q}, \vec{\sigma}) d\vec{q} d\vec{\sigma},$$

$$A(\vec{q}, \vec{\sigma}) \equiv \left[ \frac{1}{b} \int_{\delta < |\vec{r}| < R} \int_{|\vec{v}| \geq \sqrt{\mu}} e^{i(\vec{q}\vec{r} + \vec{\sigma}\vec{v})} f_1(\vec{v}) d\vec{v} \right]^N, \quad b \equiv \frac{4}{3}\pi R^3 (1 - \frac{\delta^3}{R^3}).$$

と書くことができる。ただし、 $\vec{q}, \vec{\sigma}$  はそれぞれ 3 次元ベクトルの補助変数、 $\delta$  は恒星の有効直径、 $A(\vec{q}, \vec{\sigma})$  は頻度分布関数の特性函数、また  $f_1(\vec{v})$  は (1) から誘導される相対速度  $\vec{v}$  の頻度分布関数であって次式で表わされる。

$$(5) \quad f_1(\vec{v}) d\vec{v} = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\vec{v}_0^2 + \vec{v}^2) - \frac{\vec{v}_0 \cdot \vec{v}}{\sigma^2} (\cos\chi \cos\theta - \sin\chi \sin\theta \cos\varphi)} \frac{1}{v^2} \sin\theta dv d\theta d\varphi.$$

いま、 $N/\frac{4}{3}\pi R^3 = n_0$  の条件の下で  $N, R \rightarrow \infty$  とすると、

$$A(\vec{q}, \vec{\sigma}) = \lim_{\substack{R \rightarrow \infty \\ N \rightarrow \infty}} \left[ 1 - \frac{3}{4\pi R^3} \int_{\delta < |\vec{r}| < R} \int_{|\vec{v}| \geq \sqrt{\mu}} \{1 - e^{i(\vec{q}\vec{r} + \vec{\sigma}\vec{v})}\} f_1(\vec{v}) d\vec{v} \right]^N \equiv e^{-n_0 C(\vec{q}, \vec{\sigma})}$$

$$(6) \quad C(\vec{q}, \vec{\sigma}) = \int_{\delta < |\vec{r}|} \int_{|\vec{v}| \geq \sqrt{\mu}} \{1 - e^{i(\vec{q}\vec{r} + \vec{\sigma}\vec{v})}\} f_1(\vec{v}) d\vec{v}$$

明らかに、 $-n_0 C(\vec{q}, \vec{\sigma})$  は  $W(\vec{F}, \dot{\vec{F}})$  の cumulant function に当るから、(6) を計算して  $\frac{(i_1)^{\alpha_1} (i_2)^{\alpha_2} (i_3)^{\alpha_3} (i_4)^{\alpha_4} (i_5)^{\alpha_5}}{\alpha_1! \beta_1! \gamma_1! \delta_1! \epsilon_1!} \frac{(j_1)^{\alpha'_1} (j_2)^{\alpha'_2} (j_3)^{\alpha'_3} (j_4)^{\alpha'_4} (j_5)^{\alpha'_5}}{\alpha'_1! \beta'_1! \gamma'_1! \delta'_1! \epsilon'_1!}$  ( $i_i, j_i$  は  $\vec{q}, \vec{\sigma}$  の  $x, y, z$  成分) の係数を求めると、それを  $(-n_0)$  倍したものが、 $W(x, y, z; \dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$  に対する次数  $(\alpha_1 + \dots + \alpha'_1 + \dots + \alpha'_5)$  の半不変数 (semi-invariant または cumulant) になる。こゝらの

係数を求める積分計算はかなり複雑であって、 $\alpha'=\beta'=\gamma'=0$ の場合には任意の $\alpha, \beta, \gamma$ に対する一般式がえられるが、他の場合については最初の数項の式だけを導いた。ここではこれらの諸式を示すことは省略するが、いざしも次のような函数

$$(7) \quad \begin{cases} \Pi(0, \frac{2k+1}{2}) = e^{-\frac{y}{4}} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(y/4)^v}{v!} I(v+\frac{2k+1}{2}, x), & I(v+\frac{1}{2}, x) \equiv \gamma(v+\frac{1}{2}, x) / \Gamma(v+\frac{1}{2}) \quad (\leq 1) \\ \Pi(\frac{2k+1}{2}, \frac{2k+2l+1}{2}) = e^{-\frac{y}{4}} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(y/4)^v}{v!} (v+\frac{2k+1}{2})(v+\frac{2k+3}{2}) \dots (v+\frac{2k+2l-1}{2}) I(v+\frac{2k+2l+1}{2}, x) \end{cases}$$

$$x \equiv \frac{\mu}{2\sigma^2\delta}, \quad y \equiv \frac{2V_0^2}{\sigma^2}; \quad \gamma(v+\frac{1}{2}, x) = \int_0^x e^{-x} x^{v-\frac{1}{2}} dx; \quad k, l: \text{整数}$$

と、 $\mu, \sigma, x, y$ の量および数値で表わされる。

ところで、(4)(5)(6)において $\sigma=0$  ( $\alpha'=\beta'=\gamma'=0$ ) または  $\gamma=0$  ( $\alpha=\beta=\gamma=0$ ) とおくと、 $F$  または  $\bar{F}$  の周縁分布にあたる諸式となる。 $\sigma=0$  の時には上記のように  $C(\gamma)$  の各項の形が知られ、 $|g|^2$  の無限級数となる。これは  $\delta \neq 0$  ならば一様収束するが、 $\delta=0$  の極限では、任意の $n$ につき  $|g|^{2n}$  の係数は確定しても、級数は発散に変わる。そのゆえ、星の大きさを考慮すれば揺動力 $F$ の頻度分布函数は一義的に定まるが、値実とみなせば一義的には確定しない。しかし、後者の場合でも実際には適当な項数 $n$ をとれば、近似的な $F$ の頻度分布がえられるであろう。

$\sigma \neq 0$  の場合、すなわち  $\bar{F}$  の周縁分布や  $F$  と  $\bar{F}$  の多重分布にあたる  $C(\sigma)$  や  $C(\gamma, \sigma)$  については、上述のように一般項の形がえられていないので、これらの頻度分布函数の一義性を云々

することはできない。

(c) 揺動力とその時間変化の積率：

揺動力  $F(X, Y, Z)$  およびその時間変化  $\dot{F}(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$  の積率  $\lambda_{\alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'}$   

$$\equiv \iiint_{-\infty}^{\infty} \iiint_{-\infty}^{\infty} X^{\alpha} Y^{\beta} Z^{\gamma} \dot{X}^{\alpha'} \dot{Y}^{\beta'} \dot{Z}^{\gamma'} W(X, Y, Z; \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}) dX dY dZ d\dot{X} d\dot{Y} d\dot{Z}$$
 を熟知の半  
 不変数の一組から換算することは、原理的には易しいが、6  
 次元の場合には厄介である。その手続きや、これらの積率の  
 表現式を列挙することは長くなるので省略し、それらの結果  
 についての一般的安全性だけを要約することにする。

(i) 揺動力の積率  $\overline{X^{\alpha} Y^{\beta} Z^{\gamma}}$ ：  $\alpha, \beta, \gamma$  のいおれかが奇数であれ  
 ばその積率は零となる。テスト星の運動方向は積率に変  
 化を与えないが、その速さが大きくなると積率の値が増  
 加。一般の恒星ガスでは、次数とともに積率は急激に増  
 大する。

(ii) 揺動力の時間変化の積率  $\overline{\dot{X}^{\alpha} \dot{Y}^{\beta} \dot{Z}^{\gamma}}$ ： 1 次の積率  $\overline{\dot{X}}, \overline{\dot{Y}}, \overline{\dot{Z}}$  は  
 テスト星の運動とは無関係に零となる。この結果は Cham-  
 drasekhar-von Neumann<sup>8)</sup> の結果と一致しをいび、彼等の計  
 算の方に見落としがある。テスト星の運動は2次以上の積  
 率に非対称を齎らし、運動方向とこれに直角な2方向の  
 積率の違いはその速さとともに著しくなる。

(iii) 揺動力とその時間変化の相乗積率  $\overline{X^{\alpha} Y^{\beta} Z^{\gamma} \dot{X}^{\alpha'} \dot{Y}^{\beta'} \dot{Z}^{\gamma'}}$ ： 揺動  
 力の1成分と揺動力変化の1成分の積からなる2次の積



すは、テスト星の運動と無関係に零となる。より高次の相乗積率には、(11)の場合と同様にテスト星の運動による非対称が現われる。

### § 3. 揺動力の性質

揺動力とその時間変化の積率の表式が導かれたので、次の数値で特徴付けらるる太陽近傍の恒星ガス、

$$n_0 = 10^4 \text{ pc}^3, \quad \mu = 4GM_0 = 1.8 \times 10^2 \text{ pc}^2 \text{Z}^{-2}, \quad \sigma_0 = 12 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1},$$

について、低次の積率の値を求めよう。  $\delta = \nabla_0 = 0$  とすると、

$$\sqrt{F^2} (\text{揺動力の分散}) = 0.782 \text{ pc} \cdot \text{Z}^{-2}$$

$$\sqrt{F^2} (\text{揺動力の時間変化の分散}) = 1.09 \times 10^6 \text{ pc} \cdot \text{Z}^{-3} = 1.09 \text{ pc} \cdot \text{Z}^{-2} \text{ per yr}$$

$$(F^3/F^2)^{1/2} (\text{relaxation time?}) = 7.12 \times 10^7 \text{ Z} = 0.719 \text{ yr}$$

$$(F^4/F^2)^{1/2} (\text{relaxation time?}) = 1.64 \times 10^7 \text{ Z} = 0.164 \text{ yr}$$

$$\overline{F^2 F^2} / (\overline{F^2} \cdot \overline{F^2})^{1/2} (F^2 \text{ と } F^2 \text{ の相関係数}) = 1.72 \times 10^{-5}$$

のようき数値をえる。太陽近傍における銀河円盤の重力力は、上と同じ単位 (pc, 太陽質量,  $\text{Z} = 10^6 \text{ yr}$ ) では  $6.25 \text{ pc} \cdot \text{Z}^{-2}$  となるから、揺動力の分散は  $\text{Camm}^{(9)}$  の場合に比べてかなり減っていることがわかる。しかし、従来の常識から判断するとなお過大とみられよう。揺動力の時間変化の分散や仮りの緩和時間と定めた2つの scale-time をとらえては、上掲の数値は如何にも不合理であるかのような感を与える。

これらの一見不合理であるかのような数値は、しかし揺動

力の性質そのものに由来するのであって、以下に示すように合理的な数値といえる。

揺動力とその時間変化の多重頻度分布函数(4)の具体的な表現は、原理的には(6)の  $C(\vartheta, \varpi)$ 、したがって  $A(\vartheta, \varpi)$  がわかると(4)から導かれるわけであるが、実際にこれを遂行することが困難であるために、 $W(F)$  を次の近似式でおきかえる。

$$(8) \quad 4\pi W(X, Y, Z) F^2 \simeq W_1(F) = \frac{\alpha^{(\gamma+1)/2} \beta}{\Gamma(\frac{\gamma+1}{2})} e^{-\alpha F^2} F^\gamma,$$

ただし、 $W(F)$  は  $X, Y, Z$  に関し対称であることを考慮した。(8)

において、 $\alpha F^2 = \frac{\chi^2}{2}$ ,  $\frac{\gamma+1}{2} = \frac{n}{2}$  とおくと、(8) は自由度  $n$  の  $\chi^2$  分布の頻度函数に変換できる。(8) より  $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$  の  $k$  次の積率  $\chi_k$  および  $F$  が  $F_0$  よりも大きい確率  $Pr(F > F_0)$  を表わす式が求まる。

$$(9) \quad \chi_k = \frac{\Gamma(\frac{\gamma+k+1}{2})}{\alpha^{k/2} \beta \Gamma(\frac{\gamma+1}{2})}, \quad Pr(F > F_0) = \frac{\Gamma(\frac{\gamma+1}{2}, \alpha F_0^2)}{\Gamma(\frac{\gamma+1}{2})}, \quad \Gamma(v, x) \equiv \int_x^\infty e^{-t} t^{v-1} dt$$

よって、ある恒星ガスについて揺動力の積率の値を厳密な表式で幾つか計算しておき、それらが  $\chi_k$  のそれぞれの値とほぼ一致するように  $\alpha, \beta, \gamma$  の値を定めると、 $Pr(F > F_0)$  を求めることができる。

揺動力の時間微分の周縁頻度分布  $W(F)$  は、前節 C(ii) に述べたようにテスト星が動いておれば非対称になるが、簡単のために  $V_0 = 0$  とすると、対称になる。ところで、 $F$  の積率の値が次数とともに増大するのは、 $F$  の積率の場合よりも遙かに著しい。それゆえ、 $W(F)$  の近似式にも(8)式を用いることになる。

れば、同様の手續まで  $\dot{F}$  が  $\dot{F}_0$  よりも大きい確率  $W(\dot{F})$  を導くことができる。

※1表は太陽近傍の恒星ガスについての数値例であって、確率  $Pr(F > F_0)$  または  $Pr(\dot{F} > \dot{F}_0)$  と指定したときの  $F_0$  または  $\dot{F}_0$  の値と、 $F_0$  または  $\dot{F}_0$  を指定(例へば太陽近傍での  $F$ ,  $\sqrt{F_2}$  または  $\sqrt{\dot{F}}$  など)としたときの  $Pr(F > F_0)$  または  $Pr(\dot{F} > \dot{F}_0)$  の値が示してある。

※1表 太陽近傍における  $Pr(F > F_0)$  および  $Pr(\dot{F} > \dot{F}_0)$

$Pr = 0.5$	$Pr = 0.1$	$Pr = 0.01$	$\bar{F}_0 = 5.99 \times 10^3$	$\sqrt{\bar{F}_2} = 7.81 \times 10^1$	$\alpha = 6.1$ $\beta = 1/4$ $\frac{\gamma+1}{\beta} = 1/2$
$F_0 = 1.44 \times 10^5$	$F_0 = 1.35 \times 10^6$	$F_0 = 4.33 \times 10^3$	$Pr = 0.85 \times 10^2$	$Pr = 6.1 \times 10^4$	
$Pr = 0.5$	$Pr = 0.1$	$Pr = 0.01$	$\bar{F}_0 = 3.71 \times 10$	$\sqrt{\bar{F}_2} = 1.09 \times 10^6$	$\alpha = 3.7$ $\beta = 1/55$ $\frac{\gamma+1}{\beta} = 1/2$
$\dot{F}_0 = 1.75 \times 10^{20}$	$\dot{F}_0 = 8.85 \times 10^7$	$\dot{F}_0 = 2.01 \times 10^1$			

ここで、 $\bar{F}_0$  と  $\bar{F}_2$  は fitting で求めた  $\alpha, \beta, \gamma$  の値(表の右側)を用いて(8)式で計算した  $F$  と  $\dot{F}$  の平均値である。※1表を見ると、揺動力の分布は著しく  $F=0$  付近に集中しているため、その平均値や分散値をこえる  $F$  が出現する確率はそれぞれ約1%, 約1/20%に過ぎないこと、またこの傾向は揺動力の時間変化の分布ではさらに著しいことがわかる。 $Pr=0.5$  の  $F_0$  または  $\dot{F}_0$ , すなわち公算誤差(probable error)に相対するものの数値は、パラメータの fitting 誤差を考えるとその値には受取り難いが、極めて微小であることを示すから、恒星ガスにおける揺動力の影響は、従来の2体遭遇説から想定されているものに比べ

て析はすれに大きく食達っているとは思われな。この点については次節で再び取上げる。

$F$  と  $\dot{F}$  の相関を知るには  $W(F, \dot{F})$  の具体的な表式が必要であるが、その近似式は既にえられた  $C(q, \sigma)$  (途中で cut-off を入っているが) を (4) 式に代入し Laplace 変換を行なうことによって導くことができる。しかし、ここでは上の計算を利用して大体の傾向をみるため、表 2 表に示すようにそれぞれ  $P_r$  の値を同じくする  $\sigma$  との scale time をおめてみた。

表 2 Scale time からみた  $F$  と  $\dot{F}$  の相関

$P_r =$	0.75	0.50	0.25	0.10	0.05	0.01	
$F_0 =$	$1.99 \times 10^{19}$	$1.44 \times 10^{15}$	$2.16 \times 10^9$	$1.35 \times 10^{-6}$	$3.17 \times 10^{-6}$	$4.33 \times 10^{-3}$	$\text{pc}/\text{d}^2$
$F_0/\dot{F}_0$	$9.43 \times 10^6$	$8.23 \times 10^4$	$4.55 \times 10$	1.53	$2.88 \times 10^1$	$2.16 \times 10^2$	$\text{yr} = 10^6 \text{yr}$

表 2 表から、揺動力が大きいほどその時間変化が速いであること、また初期条件が全く at random に起れば、揺動力が  $1.44 \times 10^{15} \text{ pc}/\text{d}^2$  よりも大きい場合と小さい場合が同じ確率で現われ、その scale time が  $8.23 \times 10^4$  年より長い場合と短い場合も同じ頻度となることがわかる。したがって、太陽近傍で  $\sqrt{F}/\dot{F}$  の値が 1 年程度になったのも、 $\sqrt{F}$  の値が極めて稀にしか起らぬ異常に大きい揺動力の値であったからであると解釈することができる。

#### § 4 揺動力による恒星ガスの変化

恒星ガスが希薄であるから、その進化過程は Vlasov 方程式

$$(10) \quad \frac{\partial f_0}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f_0}{\partial \mathbf{p}} + \mathbf{F}_0 \cdot \frac{\partial f_0}{\partial \mathbf{v}} = - \mathbf{F}_1 \cdot \frac{\partial f_0}{\partial \mathbf{v}}$$

で記述されるものと考える。ただし、 $f_0$  はテスト星群の速度頻度函数、 $\mathbf{F}_0$  は恒星ガス系内の平均場に働く力であるが粒子間の相互作用を無視したもの、 $\mathbf{F}_1$  はその場での揺動力(ただしフィールド星間の相互作用を無視している)である。簡単のために、ここでは  $f_0 = f_0(v_0)$ ,  $\mathbf{F}_0 = 0$  とし、揺動力のみによる恒星ガスの進化を考える。この場合、(10) は

$$(11) \quad \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial t} = - \left( \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial u} X + \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial v} Y + \frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial w} Z \right) \equiv \varepsilon$$

となり、 $\varepsilon$  は確率変数である。揺動力の成分  $X, Y, Z$  は対称的で同じ分布法則に従うから、 $t=0$  における  $f_0$  の形が与えられていると、 $\varepsilon$  の頻度分布がわかり、したがって  $J$  個の  $\varepsilon$  の和  $\sum_{j=1}^J \varepsilon$  の頻度分布も求まる。頻度分布函数の具体的な形が不明のままでも、 $\varepsilon$  の確率は既知の揺動力成分の確率から容易にえられるから、 $\sum_{j=1}^J \varepsilon$  の確率も誘導でき、 $\sum_{j=1}^J \varepsilon$  の頻度分布函数の近似式として (8) を採用すれば、(9) を利用して  $\Pr(\sum_{j=1}^J \varepsilon > A)$ 、すなわち所定の値  $A$  よりも大きい  $\sum_{j=1}^J \varepsilon$  を生じる確率が求まる。

$f_0$  の変化率  $\varepsilon$  は一組の  $(X, Y, Z)$  の値で表されるが、そのらの値は 1 回の random trial に対応するゆえ、 $\sum_{j=1}^J \varepsilon$  は  $J$  回の独立な

\*揺動力の計算には、簡単のためフィールド星の速度分布に (1) を仮定したが、これは遊離星を判別するのに使われたのに過ぎない。たとえば、近似的には  $f_0$  の型が  $f_0(v)$  としても (1) と同じでなくともよいであろう。しかし、この場合にはテスト粒子群がフィールド粒子群に比べて極めて希薄であることが必要である。

random trials による  $f_0$  の合成変化率とみられる。ある時刻にランダムな空間分布をしている恒星ガスの各粒子が、再びそれと独立なランダムな空間配置をとるまでの時間  $\tau$  を正確に評価するのは難しいが、粒子の空間速度の分散  $\sqrt{3}\sigma_0$  の速さで粒子間の平均距離  $1/n_0$  を進むに要する時間  $\tau$  とせば、 $\sum_{j=1}^J \epsilon_j$  は時間  $J\tau = J/\sqrt{3}\sigma_0 n_0$  に対応付けられる。 $n_0, \mu, \sigma, f_0$  などを固定した恒星ガスがランダムな初期条件から出発し、十分長い時間  $J\tau$  がたてば、その間に恒星ガスが経過する諸段階は、時刻に前後があるとしても、 $J$  回の random trials よりなるとみれば、 $\sum_{j=1}^J \epsilon_j$  は時間  $J\tau$  間の総変化率と考えることができる。もちろん、その間に  $f_0$  が変化していくから順次改訂の必要がある。

以上のようを考え方、太陽近傍の恒星ガス ( $\tau = 10^4 \text{ yr}$ ) につき、テスト粒子はフィールド粒子と同じ Maxwell 型速度分布 ( $\sigma = 12 \text{ km/s}$ ) に従うとして、 $J = 10^7, 10^8, 10^9$  のそれぞれに対する  $\text{Pr}(\sum_{j=1}^J \epsilon_j(v_0) > A)$  を求めてみた。ただし、計算を簡単にするため  $f_0(v_0) = f(v_0)$  は一定のままとした。付図は  $\frac{\sigma+1}{\sigma} = 1$  の場合における  $v_0 = 0.5\sigma, 2.74\sigma$  の 3ヶ所における  $A$  の値を示したものである。

2 体遭遇論では恒星ガスの緩和時間 (Relaxation time) は  $\sum (\Delta E)^2 / E^2 = 1$  または  $\sum \Delta \ln^2 E = 1$  で定義されており、太陽近傍では  $10^{14} \text{ yr}$  である。<sup>12)</sup>  $\sum_{j=1}^J \frac{1}{E_j} \frac{dE_j}{dt}$  を求めたいので、付図の結果を 2 体遭

遭遇論の緩和時間と比較することはできない。しかし、時間  $J$  後の速度分布関数がほぼ Maxwell 型で近似できると仮定すれば、その変化  $\Delta f(v) = f(v, J) - f(v, 0)$  は平均運動エネルギーの変化  $m\sigma^2 - m\sigma_0^2 = (k-1)m\sigma_0^2$  に対応させることができる (オ 2 表)。付図には

オ 2 表  $\Delta f(v)/f(v_0)$

$k=1/4, 1/2, 2, 4$  に対応する  $|\Delta f(v)/f(v_0)|$

$v/v_0$	$1/4$	$1/2$	2	4
$\sigma/2$	4.50	1.50	-0.62	-0.86
$\sqrt{3}\sigma$	-0.91	-0.37	-0.25	-0.61
$2.74\sigma$	-1.00	-0.93	1.31	0.03

の値が横線で示してある。二

つとみると、約  $10^{13}$  年 ( $J=10^8$ ) に

つと全粒子の 50% が最初の速

動エネルギーを  $1/4 \sim 1/2$  乃至  $2 \sim 4$  倍

に変えるとみられようである。前に断ったように  $\sum_{f(v)} \frac{1}{f(v)} \frac{\partial f(v)}{\partial t}$  の計算に  $f(v)$  の改訂を行ってはいないが、2体遭遇論からの緩和時間と比べると、この  $J$  の値は 1 桁山とい。

2体遭遇論による遭遇効果の算定と上述の確率論的考察との相異点は、(1) フィールド星の速度分布はいずれも Maxwell 型を仮定していても、前者ではそれが無限遠まで成立つとあるのに対し、後者ではどこでも成立つとしたこと、また (2) 取扱う量が前者ではフィールド星が無限遠からまで再び無限遠に去る間にテスト星に入る力種であるのに対し、後者では全フィールド星がテスト星に及ぼす力であることである。2体遭遇論では、したがつて作用時間がはいり込んでいるが、遭遇効果を評価する際テスト星からある距離以上に遠くでの遭遇は cut-off

エから、作用時間は零から無限大に跨がり、 $\frac{\partial f}{\partial t}$ をどこだけの有効時間の平均とみてよいのか判然としない。また、フィールド星の速さがテスト星のそれに近づけば共鳴的現象が現われるが、従来の取扱いではすべて無視している。

ガス粒子の相互作用を一義的に追求する場合には、問題としている変数量、例えば  $\frac{\partial f}{\partial t}$  は平均的なものを表わすとみてよい。しかし、揺動力の立場では平均値は必ずしも代表値とは認め難く、確率的に変化を追求する方がより妥当である。正規型分布函数は、Boltzmann方程式やVlasov方程式を満足するので変らぬというのも、平均においてと解される(11)において  $\bar{x}=\bar{y}=\bar{z}=0 \therefore \frac{\partial f}{\partial t}=0$ )。本節で取扱った簡単な1例は、初めMaxwell型の速度分布であった場合でも、恒星ガスの平均運動エネルギーが非可逆的に変わり、したがって平均密度が一定のまゝでも、局所的に粒子の凝集や拡散が起りうることを示す。しかし、ランダム試行の回数  $J$  を遙かに大きくとれば、大数の法則によつて、 $\sum \frac{\partial f(\mathbf{v})}{\partial t} / f_0(\mathbf{v})$  は正規分布に近づくから、フラックスは大きいながらも平均的には最初の速度分布となる。

追記 §4の  $\sum \frac{(\mathbf{v} \cdot \mathbf{E})^2}{E^2} = 1$  に相当する緩和時間の計算は、その後より近似で繰返したとて、本稿の値よりも長くなった。しかし、加速度にあたる  $\frac{1}{f_0} \frac{\partial f_0}{\partial t}$  もも考慮に入ると、結果的には緩和時間は本稿の値よりも短くなる見込みである。



付図 (p.14)

$$\sum \frac{1}{f(\sigma)} \frac{d(f(\sigma))}{d\sigma} \text{ for } Pr=0.5$$
